

на полном их множестве допустимых вариантов в случае трех локальных критериев оптимальности и нескольких принципов компромисса, что значительно повышает уровень обоснованности решения по сравнению с ранее полученным результатом решения этой же задачи.

Список литературы: 1. Гамаюн И. П. Автоматизированный синтез структурированного представления сложной технической системы // Управляющие системы и машины. – Киев, 2000. - №1. –С.21-26. 2. Гамаюн И. П., Борисевич О. В. Автоматизация процесса формирования математической модели системного технического объекта сборки // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2003. - №7 (Т. 1). – С.3-14. 3. Гамаюн И. П., Коваленко Е. С. Определение оптимального варианта технологической схемы сборки с учетом типа производства // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. - №18. – С.19-24. 4. Михалевич В.С., Волкович В. Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. – М.: Наука. – 1982. – 287 с.

Поступила в редколлегию 31.10.06

УДК 681.3.07

Е.П.ПУТЯТИН, д-р техн. наук, **А.В.ГОРОХОВАТСКИЙ**

ПОСТРОЕНИЕ ИНВАРИАНТНЫХ МОМЕНТНЫХ ПРИЗНАКОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОМЕРНЫХ ПРОЕКЦИЙ

Наведено результати досліджень по формуванню інваріантних до геометричних перетворень ознак зображень. Інваріанти базуються на застосуванні перетворення Радона з подальшим представленням у вигляді послідовності моментів, обчислених для одновимірних проєкцій. Отримано аналітичний вигляд інваріантів, наведено результати дослідження швидкодії їх обчислення та завадозахищеності при розпізнаванні зображень цифр.

The results of researches on formation of invariant attributes in geometrical transformations are given. Invariants are based on application of transformation of Radon with the further representation as sequence of the moments calculated for one-dimensional functions. Analytical expressions of invariants are received, results of speed of their calculation and noise immunity are resulted at recognition of images of figures.

1. Введение. Построение инвариантов и нормализация геометрических преобразований – это основные проблемы компьютерного зрения [1]. Эффективным путем их решения с точки зрения быстродействия является построение признаков проекций изображения, формируемых на базе применения преобразования Радона [2,3]. Достоинствами проекций есть высокая помехозащищенность, а также простая и быстрая реализация соответствующих алгоритмов. Быстродействие таких методов в сотни раз выше соответствующих показателей корреляционного метода [2]. Известны применения классических инвариантных моментных признаков на базе преобразования Радона при распознавании подписей [4]. При этом вопросы изменения образов Радона под воздействием геометрических преобразований еще недостаточно исследованы. Естественным путем упрощения инвариантов является их построение для одномерных пространств функций проекций. Это должно обеспечить упрощение процедур

распознавания с сохранением высокой помехозащищенности и быстродействия.

Цель работы – построение инвариантных к геометрическим преобразованиям значений признаков на базе одномерных проекций.

Задачи исследования – вывод аналитических значений инвариантов, исследование влияния параметров геометрических преобразований на функции проекций, оценка быстродействия и помехозащищенности соответствующих методов распознавания.

2. Построение инвариантов. Моментные инварианты являются удобной и надежной системой признаков при распознавании визуальных объектов [1,5,6]. Распространение получили в основном двумерные инварианты, сформированные в том числе и на основе двумерных сигналов, полученных применением к исходному изображению $B(i, j)$ преобразования Радона [4]. Рассмотрим выражение для одномерных моментов в виде:

$$m_k = \int_X f(x) x^k dx, \quad (1)$$

где $f(x)$ – функция, для которой вычисляется момент, X – область определения функции $f(x)$, $k = 0, 1, \dots$ – порядок момента. Считается, что область определения X функции $f(x)$ не изменяется при её геометрических преобразованиях [1]. Использование моментов в качестве признаков базируется на теореме, устанавливающей взаимно однозначное соответствие между функцией $f(x)$ и набором её моментов m_k [5].

Выражение для центральных моментов имеет вид:

$$\mu_k = \int_X f(x) \left(x - \frac{m_1}{m_0}\right)^k dx, \quad (2)$$

где m_0 , m_1 – соответственно моменты нулевого и первого порядка, вычисленные по формуле (1). Известно, что центральные моменты μ_k инвариантны к преобразованиям смещения функции $f(x)$.

При смещениях изображения $B(i, j)$ в поле зрения D с параметрами a_1, a_2 в виде $B(i + a_1, j + a_2)$ его радоновский образ $R(p, \theta, a_1, a_2)$ задается выражением [2]:

$$R(p, \theta, a_1, a_2) = R(p + a_1 \cos \theta + a_2 \sin \theta, \theta)$$

что при фиксированном θ соответствует однопараметрическому смещению по параметру p в пространстве радоновских образов. Таким образом, центральные моменты μ_k , вычисленные для функции $R(p, \theta, a_1, a_2)$ по

переменной p при фиксированном θ , являются инвариантами к смещениям исходного изображения. В то же время величины μ_k можно рассматривать как функции от параметра θ .

При преобразованиях однородного масштаба вида $B(i\alpha, j\alpha)$, где α - параметр масштаба, соответствующий радоновский образ изменяется по закону [2]:

$$R(p, \theta, \alpha) = \frac{1}{\alpha} R(\alpha p, \theta).$$

В этой ситуации для построения инвариантов на базе функции $R(p, \theta, \alpha)$ предлагается использовать следующие значения:

$$\xi_k = \frac{m_k}{\frac{k+2}{(m_0)^2}}, \quad (3)$$

построенные на основе моментов вида (1).

Докажем их инвариантность к преобразованиям однородного масштаба. В значениях моментов в выражении (3) сделаем замену: $p' = \alpha p$. При подстановке получаем:

$$\xi_k = \frac{\frac{1}{\alpha^{k+2}} \int_P R(p', \theta) p'^k dp'}{\frac{1}{\alpha^2} \int_P R(p', \theta) dp'} = \frac{\int_P R(p', \theta) p'^k dp'}{\int_P R(p', \theta) dp'},$$

где P - область определения параметра p преобразования Радона. Видно, что последнее выражение уже не зависит от α , а, значит, значение ξ_k является инвариантом к однородному масштабированию.

Инвариантами к комбинации преобразований смещений и однородного масштаба исходного изображения $B(i, j)$ являются величины

$$\zeta_k = \frac{\mu_k}{\frac{k+2}{(\mu_0)^2}}, \quad (4)$$

полученные подстановкой в (3) значений центральных моментов μ_k вместо моментов m_k . Заметим, что в вычислительном аспекте величина (4) является более

сложной, чем (3).

При неоднородном масштабировании изображения с параметрами α_1 и α_2 в виде $B(i\alpha_1, j\alpha_2)$ для преобразования Радона имеем выражение [2]:

$$R(p, \theta, \alpha_1, \alpha_2) = \frac{1}{\alpha_1 \alpha_2} \iint_D B(x', y') \delta(p - \frac{x'}{\alpha_1} \cos \theta - \frac{y'}{\alpha_2} \sin \theta) dx' dy', \quad (5)$$

где $B(x', y')$ - функция изображения с областью определения D . В частности, при $\theta = 0$ радоновский образ согласно (5) имеет вид зависимости:

$$R(p, 0, \alpha_1, \alpha_2) = \frac{1}{\alpha_2} R(\alpha_1 p, 0),$$

а при $\theta = 90^\circ$

$$R(p, 90^\circ, \alpha_1, \alpha_2) = \frac{1}{\alpha_1} R(\alpha_2 p, 90^\circ),$$

что говорит о глубокой взаимосвязи величин поворота θ и масштабирования α_1, α_2 в радоновском пространстве.

В качестве инвариантной системы признаков для преобразований неоднородного масштаба предлагаются функции вида:

$$v_k = \frac{\int (R(p, \theta))^{k+1} p^k dp}{(m_0)^{k+1}}, \quad (6)$$

построенные на функциональных моментах [1] степени $k+1$ от радоновского образа $R(p, \theta)$. Докажем их инвариантность. Для этого выполним замену переменных в соотношениях (5), (6), после чего получаем:

$$v_k = \frac{\left(\frac{1}{\alpha_1 \alpha_2}\right)^{k+1} \int \frac{R(p', \theta)^{k+1} p'^k dp'}{P}}{\left(\frac{1}{\alpha_1 \alpha_2}\right)^{k+1} \left(\int \frac{R(p', \theta) dp'}{P}\right)^{k+1}} = \frac{\int R(p', \theta)^{k+1} p'^k dp'}{\left(\int R(p', \theta) dp'\right)^{k+1}}.$$

Как видим, результирующее выражение не зависит от параметров масштаба α_1, α_2 , что означает его инвариантность.

Инвариантами к смещениям и неоднородным масштабам будут следующие

$$\gamma_k = \frac{\int (R(p, \theta))^{k+1} (p - \frac{m_1}{m_0})^k dp}{(\mu_0)^{k+1}} \quad (7).$$

Основная идея построения инвариантов вида (3), (4), (6), (7), как видим, состоит в формировании выражений в виде отношения моментов (линейных функционалов), в которых исключено влияние заданных параметров геометрических преобразований.

Рассмотрим теперь построение инвариантов при преобразованиях поворота изображения на угол φ . Радоновский образ при этом изменяется по закону [2]:

$$R(p, \theta, \varphi) = R(p, \theta - \varphi).$$

Как видим, поворот исходного изображения на угол φ приводит к соответствующему смещению радоновского образа по параметру θ при фиксированном значении p . Это делает возможным применение уже полученных соотношений (2), (4) в качестве инвариантных признаков к поворотам. Значения моментов в выражениях (2), (4) теперь надо вычислять по переменной θ .

Рассмотрим теперь пути построения инвариантов для более сложных комбинированных преобразований изображений. Такие инварианты можно построить на использовании уже полученных соотношений.

Так при комбинации преобразований масштабирование-поворот предлагается использовать интегрирование инвариантных функций (3) и (6) по переменной θ , в результате получим соответствующие инварианты в виде

$$\int \xi_k(\theta) d\theta, \quad \int v_k(\theta) d\theta.$$

При преобразованиях метрической группы (масштабирование, поворот, смещения) применим интегрирование инвариантных функций (4), (7) по переменной θ . Полученные инварианты имеют вид интегралов

$$\int \zeta_k(\theta) d\theta, \quad \int \gamma_k(\theta) d\theta. \quad (8)$$

3. Реализация

При дискретном представлении функция изображения и его преобразование Радона имеют вид матриц. Пусть $N \times N$ - размер исходного изображения, $M \times N$ - размер его матрицы преобразования Радона, где N - количество дискретных значений по переменной p , M - количество дискретов по переменной θ . Подсчитаем количество необходимых арифметических операций для вычисления классических и предложенных инвариантов. Для этого сравним число операций при вычислении стандартного двумерного центрального момента μ_{02} и предложенного инварианта (4). Обе эти

величины есть инвариантами к преобразованиям смещения, а величина (4) является еще и инвариантом к однородному масштабу. Время формирования классического

инварианта можно оценить величиной:

$$N \times N \times t_c \times (1 + 6t_c + 9t_c^2),$$

где t_c - время сложения, а время умножения для определенности принято равным значению $3t_c$. Для предложенных инвариантов (4) на базе одномерных проекций оценка составляет:

$$N \times t_c \times (2 + 12t_c + 15t_c^2).$$

Сравнивая приведенные значения оценок, видим, что быстродействие вычисления предложенных инвариантных значений по отношению к классическим инвариантам несколько выше, так как соотношение описанных

величин равно примерно $\frac{3}{5}N$. Видно, что выигрыш растет пропорционально размеру изображения N .

4. Эксперименты

На рис. 1 в качестве примера приведены изображения и полученные для них значения инвариантов (7) к комбинации преобразований неоднородного масштаба и смещений. На рис.2 приводятся изображения и нормированные по количеству строк значения инвариантов вида (8) к поворотам.

Исходное бинарное изображение имеет размеры 64×64 , яркость информационной части сигнала изображения принята равной 0, яркость фона – значению 255. После сегментации яркость сигнала равна 1, фона – 0. Инварианты вычисляются для сегментированных изображений.

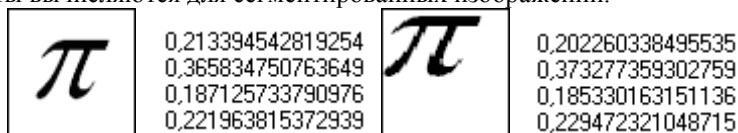


Рис.1 Изображения и инварианты (смещения, масштабирование)

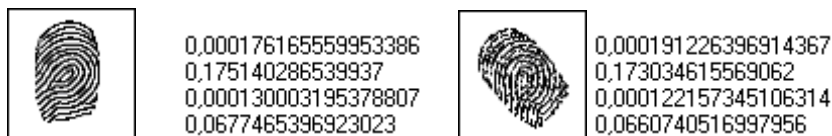


Рис.2 Изображения и инварианты к повороту

Как видим, вычисление описанных инвариантов осуществляется с достаточно высокой точностью, которая для принятого в эксперименте поля зрения находится в пределах значения 5%.

Изучим теперь действие аддитивного гауссового шума на примере наиболее простых инвариантов вида (4) к смещениям. Отношение сигнал-шум на сегментированном изображении будем измерять величиной $\psi = \frac{1}{\sigma}$, где σ - среднеквадратическое отклонение аддитивного шума с нулевым средним, 1 – амплитуда сигнала изображения.

На рис. 3 приведены примеры изображений и соответствующие значения инвариантов: 3,а) – для эталонов, 3,б) – при $\psi = 0,2$.



Рис.3 Действие аддитивного шума на инварианты к смещениям:
а) изображение и инварианты без шума, б) изображение и инварианты при соотношении $\psi = 0,2(\sigma = 5)$.

Исследования показали, что инварианты на базе преобразования Радона с точки зрения помехозащищенности намного эффективнее по сравнению с классическими инвариантами, построенными на двумерных центральных моментах. При уровнях $\psi = 0,2(\sigma = 5)$ и $\psi = 0,1(\sigma = 10)$ относительная погрешность в определении значений предлагаемых инвариантов вида (4) составила 1% и 3% соответственно. Для классических же инвариантов при $\psi = 0,2$ погрешность еще находится в допустимых пределах (3%), но уже при $\psi = 0,1$ эти инварианты использовать нельзя, так как погрешность достигает величины 50%.

Статистические эксперименты по исследованию помехозащищенности применения предложенных и классических инвариантов состояли в следующем. В качестве распознаваемого набора выбраны изображения цифр шрифта Times New Roman с яркостью 1 на фоне яркости 0 в поле 64×64 . Непосредственно изображения цифр при этом находились в пределах прямоугольника размером 15×20 , т.е. относительная площадь распознаваемых цифр равнялась примерно 7,3% поля зрения. На вход подавалось преобразованное, зашумленное действием аддитивного шума изображение, выбранное случайным образом из набора 10 эталонов. Вероятность распознавания оценивалась как частота правильных решений в серии из 1000 реализаций шума.

Эксперименты показали, что вероятность распознавания цифр до уровня $\psi = 0,3(\sigma = 3)$ равна 1, а при уровне шума $\psi = 0,2(\sigma = 5)$ составляет

величину 0,99 как с использованием предложенных, так и классических инвариантов. При дальнейшем росте уровня помех $\psi = 0,15 (\sigma = 7)$ соответствующие вероятности равны 0,97 и 0,8, а при $\psi = 0,1 (\sigma = 10)$ преимущество предлагаемых одномерных инвариантов становится подавляющим, т.к. вероятности правильного распознавания равны 0,86 и 0,4.

5. Выводы

Научная новизна предложенного подхода состоит в сочетании интегральных свойств преобразования Радона с переходом из двумерного пространства изображений в пространство векторов-проекций, что в результате дает повышение эффективности применительно к задачам построения инвариантов и распознавания. Преобразование Радона позволяет выделить спектр существенных свойств сигнала изображения. Помехозащищенность при использовании одномерных проекций из-за влияния интегральных свойств преобразования Радона остается на высоком уровне, а время вычислений значительно сокращается в линейной пропорции к размеру изображения.

Практическая значимость работы заключается в повышенном быстродействии предложенных процедур распознавания по сравнению с классическими подходами, а также высокой устойчивости к шуму, что подтверждается экспериментами на реальных изображениях.

Использование полной информации о матрице преобразования Радона в виде множества функций проекций позволяет построить для любого фиксированного набора эталонов достаточное для качественного распознавания количество эффективных инвариантных признаков.

Список литературы: 1. Путьтин Е.П., Аверин С.И. Обработка изображений в робототехнике. М.: Машиностроение, 1990.- 320 с. 2. Гороховатский А.В., Путьтин Е.П. Применение преобразования Радона для нормализации изображений. // Бионика интеллекта. – Харьков: ХНУРЭ, 2005. №1(62).- с. 3-9. 3. Хермен Г. Восстановление изображений по проекциям.- Москва: Мир, 1983.- 350с. 4. Трипольська В.В. Класифікація підписів на основі інваріантних моментів простору ознак перетворення Радона // Прикладная геометрия и компьютерная графика, 2002, №71, с. 235-239. 5. Анисимов Б.В., Курганов В.Д. Злобин В.К. Распознавание и цифровая обработка изображений. Учебное пособие для вузов. – Москва: Высшая школа, 1983. -294с. 6. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. Пер. с англ. Москва: Издательский дом «Вильямс», 2004. 928 с.

Поступила в редколлегию 11.10.06

УДК 681.3.07

В.А. ГОРОХОВАТСКИЙ, кандидат технических наук

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕДУР ГОЛОСОВАНИЯ В СТРУКТУРНЫХ МЕТОДАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ВИЗУАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Приведено результати досліджень по розпізнаванню зображень шляхом порівняння їх представлень у вигляді множин локальних ознак. Розглянуті методи голосування є